Физика конденсированного состояния

Краткое сообщение
УДК 537.226
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.18101

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА И НАНОЧАСТИЦ ТИТАНАТА БАРИЯ

С. В. Барышников [1], А. Ю. Милинский [1],
Е. В. Стукова [2] ✉, А. Э. Львов [1]

[1] Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск, Россия;
[2] Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия
✉ lenast@bk.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования диэлектрических свойств композитов $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ (при x = 0,10 и 0,20), полученных путем смешивания порошков TGS с наночастицами $BaTiO_3$ (размеры частиц составляли соответственно 3–5 мкм и 400 нм). Поверхности образцов изучались методом электронной микроскопии, исследовались температурные зависимости диэлектрической проницаемости объектов. Для контроля эффективной спонтанной поляризации образцов измерялся пироэлектрический эффект. С целью измерения пироэлектрического тока образцы предварительно подвергали поляризации при комнатной температуре. Для композитных образцов при нагреве выявлено повышение температуры Кюри $\Delta T_C \approx 3$ °C для TGS в составе композитов, увеличение диэлектрической проницаемости композитов и уменьшение тангенса угла диэлектрических потерь, по сравнению с чистыми образцами TGS. Обнаружено появление температурного гистерезиса и размытие фазового перехода TGS в составе композитов.

Ключевые слова: триглицинсульфат, композит, диэлектрическая проницаемость, наночастица, титанат бария, фазовый переход

Для цитирования: Барышников С. В., Милинский А. Ю., Стукова Е. В., Львов А. Э. Диэлектрические свойства композитов на основе триглицинсульфата и наночастиц титаната бария // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 1. С. 9–17. DOI: https://doi.org/10.18721/ JPM.18101

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Brief communication
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.18101

DIELECTRIC PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON TRIGLYCINE SULFATE AND BARIUM TITANATE NANOPARTICLES

S. V. Baryshnikov [1], A. Yu. Milinskiy [1],
E. V. Stukova [2] ✉, A. E. Lvov [1]

[1] Blagoveshchensk State Pedagogical University, Blagoveshchensk, Russia;
[2] Amur State University, Blagoveshchensk, Russia
✉ lenast@bk.ru

Abstract. In the paper, the results of investigations in dielectric properties of composites $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ with x = 0.10 and 0.20 have been presented. The composites were prepared

© Барышников С. В., Милинский А. Ю., Стукова Е. В., Львов А. Э., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

by mixing TGS powders with $BaTiO_3$ nanoparticles (3–5 μm and 400 nm in size, relatively). The sample surfaces were examined by electron microscopy, the temperature dependencies of permittivity of the subjects of investigation were studied. To control the effective spontaneous polarization of the samples, their pyroelectric effect was measured. In order to do it, the samples were previously polarized at room temperature. In heating, for composite samples, an increase $\Delta T_C \approx 3$ deg.C in the Curie temperature was revealed for TGS contained in the composites, a rise in the permittivity of composites and a decrease in the tangent of their dielectric loss angle compared with pure TGS samples. The appearance of temperature hysteresis and blurring of the TGS phase transition taking place in the composites was detected.

Keywords: triglycine sulfate, composite, dielectric constant, nanoparticles, barium titanate, phase transition

For citation: Baryshnikov S. V., Milinskiy A. Yu., Stukova E. V., Lvov A. E., Dielectric properties of composites based on triglycine sulfate and barium titanate nanoparticles, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (1) (2025) 9–17. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.18101

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Введение

Органические сегнетоэлектрики с водородными связями, такие как сегнетова соль и триглицинсульфат (TGS), являются важными объектами исследования для электронной промышленности благодаря их уникальным свойствам. Отличительная характеристика этих материалов – их способность к переключению спонтанной поляризации, что позволяет создавать высокоэффективные электронные компоненты, способные работать в широком диапазоне технологических приложений. Эти сегнетоэлектрики используются для создания микросхем памяти, транзисторов, конденсаторов и т. п. [1 – 6].

Триглицинсульфат можно считать классическим, хорошо изученным сегнетоэлектриком. В последние годы наблюдается увеличение числа исследований композитных и нанокомпозитных структур на основе TGS. Эти новые направления исследований открывают перспективы для создания материалов с улучшенными характеристиками и расширенными функциональными возможностями [7 – 12]. В работе [9] было показано, что TGS может взаимодействовать через водородные связи с частицами наноцеллюлозы, что приводит к повышению его температуры Кюри. В исследовании [10] для TGS с окисленными углеродными нанотрубками также обнаружено увеличение температуры Кюри. Возникновение водородных связей между TGS и оксидом алюминия Al_2O_3 наблюдалось в работе [11]. В статье [12] сообщается об исследовании магнитоэлектрического композита TGS с железной окалиной (TGS + Fe_3O_4). Авторы указывают, что магнитоэлектрическая связь предположительно возникла для композита TGS + 10 мас. % Fe_3O_4, о чем свидетельствует сдвиг температуры фазового перехода в TGS.

В данной работе представлены результаты исследования диэлектрических свойств и пироэлектрического тока композитов формулы $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ (x = 0,10; 0,20), полученных на основе триглицинсульфата (с размером частиц 3 – 5 мкм) и тетрагональных наночастиц титаната бария $BaTiO_3$ размером 400 нм.

Образцы и методика эксперимента

Кристаллы TGS при нагреве до температуры T_C = 49°C претерпевают фазовый переход из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу. Ниже этой температуры TGS обладает полярной моноклинной симметрией. Вектор спонтанной поляризации направлен вдоль оси b, и при 20°C ее значение составляет 2,8 мкКл/см^2. Выше температуры T_C TGS находится в неполярной моноклинной фазе [13].

Титанат бария $BaTiO_3$ при комнатной температуре находится в тетрагональной фазе со спонтанной поляризацией 26 мкКл/см^2. Выше 120°C титанат бария переходит в кубическую парафазу [13].

© Baryshnikov S. V., Milinskiy A. Yu., Stukova E. V., Lvov A. E., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

В данном исследовании использовались нанопорошки титаната бария, средний размер частиц которых равен 400 нм (производство компании Mann Grain Nano Technology Co., Ltd., Германия). Их чистота составляла 99,9 %. В исследуемом температурном диапазоне частицы $BaTiO_3$ размером 400 нм обладали тетрагональной симметрией.

Композитные материалы системы $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ были изготовлены посредством механического смешивания порошка TGS и наночастиц $BaTiO_3$ в агатовой ступке в течение 10 мин. Частицы TGS и $BaTiO_3$ обладали средними размерами соответственно 5 мкм и 400 нм. Полученную смесь прессовали под давлением 7500 кг/см^2 в таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1 мм.

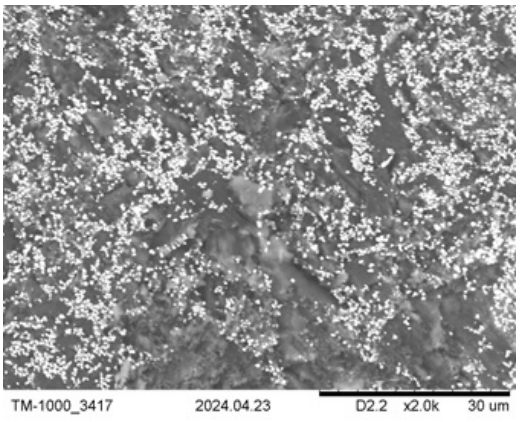

Рис. 1. Электронная микрофотография поверхности композита $(TGS)_{0,90}/(BaTiO_3)_{0,10}$ (размер частиц $BaTiO_3$ – 400 нм, увеличение – 5000)

В данной работе исследовали композиты $(TGS)_{0,90}/(BaTiO_3)_{0,10}$ и $(TGS)_{0,80}/(BaTiO_3)_{0,20}$; в качестве эталонных образцов использовали спрессованные порошки TGS. На рис. 1 представлена электронная микрофотография поверхности композита $(TGS)_{0,90}/(BaTiO_3)_{0,10}$.

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости композитов регистрировали на частоте 10^6 Гц с помощью измерителя Е7-25. Для контроля эффективной спонтанной поляризации образцов измерялся пироэлектрический эффект. Известны различные методы определения пироэлектрического коэффициента, когда измеряют напряжение, заряд или ток, возникающие при изменении температуры кристалла. Однако если в процессе варьирования температуры изменяется полное сопротивление образца, наиболее удачным считается измерение пироэлектрического тока или заряда в условиях короткого замыкания (когда сохраняется постоянство электрического поля E [14]).

Условие короткого замыкания в нашем случае поддерживалось с помощью операционного усилителя AD620. Для измерения пироэлектрического тока образцы предварительно подвергали поляризации при комнатной температуре и напряженности электрического поля 5 кВ/см; скорость нагрева при измерении поддерживалась постоянной и составляла 5 К/мин. Сигнал с усилителя через аналого-цифровой преобразователь ZET 210 подавался на компьютер для дальнейшей обработки.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Согласно зависимостям $\varepsilon'(T)$ для прессованного порошка TGS, максимум ε' при нагреве и охлаждении фиксируется около 49,5°С (см. таблицу). Пиковое значение $\varepsilon'(T)$ для образца TGS составляет 45,6, что более чем на порядок ниже аналогичного показателя для монокристалла [13], что обусловлено усреднением свойств по различным кристаллографическим осям.

В таблице приведены значения температуры T_h, при которых наблюдаются максимальные значения диэлектрической проницаемости при нагреве образцов (они тоже даны в таблице).

Фазовый переход в композитах $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ характеризуется размытостью и сдвигом в область более высокой температуры (рис. 2). Также наблюдается температурный гистерезис фазового перехода.

Результаты измерения пироэлектрического тока для поликристалла TGS и композитов $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ показаны на рис. 3. Отметим, что для исследования пироэлектрического тока использовались образцы одинаковых размеров, одинаковые условия поляризации и скорость нагрева.

Анализ графиков на рис. 3 позволяет заключить, что увеличение объемной концентрации частиц $BaTiO_3$ в композите приводит к усилению пироэлектрического отклика. Частицы размером 400 нм находятся в тетрагональной фазе, которая характеризуется

Таблица

Результаты измерений синтезированных образцов

Образец	T_h	ΔT	ε'_{max}		tgδ
	°C		при нагреве	при охлаждении	
TGS	49,5	0,0	41,7	45,6	0,17
$(TGS)_{0,90}/(BaTiO_3)_{0,10}$	53,2	4,8	47,0	51,6	0,11
$(TGS)_{0,80}/(BaTiO_3)_{0,20}$	53,6	5,1	49,2	52,1	0,07

Обозначения: T_h – температура, при которой наблюдается значение ε'_{max} при нагреве; ΔT – величина гистерезиса, ε'_{max} – максимальное значение диэлектрической проницаемости; tgδ – тангенс угла диэлектрических потерь в точке фазового перехода на 1 кГц.

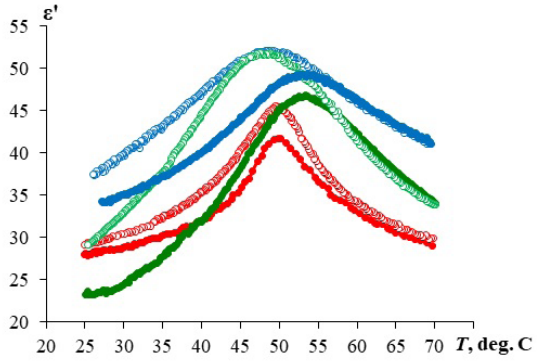

Рис. 2. Зависимости ε'(T) для TGS (красные символы) и композитов $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ с двумя значениями x: 0,10 и 0,20 (зеленые и синие символы, соответственно). Данные получены при нагреве и охлаждении (заполненные и незаполненные символы, соответственно)

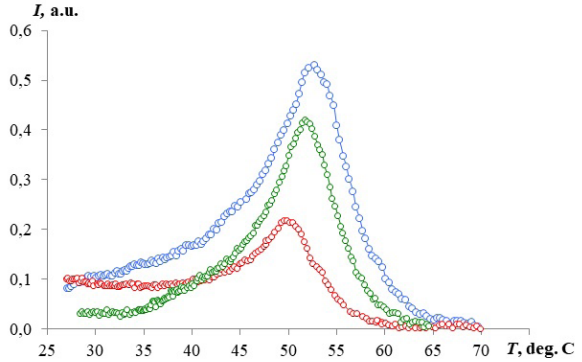

Рис. 3. Температурные зависимости пироэлектрического тока для TGS (красные символы) и композитов $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ при x = 0,10 и 0,20 (зеленые и синие символы, соответственно).

Данные получены для образцов одинакового размера, при одинаковых условиях предварительной поляризации и скорости нагрева

наличием спонтанной поляризации и, следовательно, выраженными пироэлектрическими свойствами. Тетрагональные частицы титаната бария способствуют дополнительной поляризации композита, вследствие большего (на порядок) значения спонтанной поляризации, по сравнению с таковой для TGS. Увеличение концентрации частиц $BaTiO_3$ в композите $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ с 10 до 20 % усиливает общий пироэлектрический отклик композита на 21% (см. рис. 3).

Согласно найденным литературным источникам, основными причинами смещения температуры Кюри в сегнетоэлектрических композитах являются электрические взаимодействия, хотя не исключены и другие факторы, такие как механические напряжения [15] или образование водородных связей между компонентами композита [11, 16].

При подведении итогов проведенного экспериментального исследования следует особо выделить такие явления, как размытие сегнетоэлектрического фазового перехода, повышение температуры Кюри и появление температурного гистерезиса для частиц триглицинсульфата, входящего в состав композитов.

Размытие сегнетоэлектрического перехода TGS можно объяснить в рамках теории фазовых переходов, разработанной Л. Д. Ландау и В. Л. Гинзбургом. Для учета неоднородности поляризации, в разложение вводится дополнительное слагаемое, включающее первые производные поляризации по координатам $(\nabla P)^2$ [17]:

$$F = \frac{1}{2}\alpha_0 (T - T_0) P^2 + \frac{1}{4}\beta P^4 + \frac{1}{2}\delta (\nabla P)^2 - EP, \quad (1)$$

где α_0, β, δ – температурно-независимые коэффициенты.

Использовав разложение (1), авторы работы [18] получили уравнение, определяющее зависимость $\varepsilon'(T)$, которая учитывает неоднородное распределение поляризации:

$$\varepsilon'(T) \approx 1 + \frac{1}{\alpha_0 (T - T_0) + f\left(P(\mathbf{r}), T\right)}, \quad (2)$$

где $f(\mathrm{P}(\mathbf{r}), T) = 2\delta(T) d(\Delta P(\mathbf{r}), T)/dP$.

Именно наличие дополнительного неоднородного слагаемого в выражении (2) описывает размытие зависимости $\varepsilon'(T)$, полученной для неоднородной сегнетоэлектрической системы. Величина этого размытия определяется степенью неоднородности композита. Другими словами, размытие сегнетоэлектрического перехода обусловлено неоднородностью структуры композита.

Для описания эффекта изменения температуры Кюри триглицинсульфата в композите $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$, запишем энергию F композита в виде суммы трех энергетических слагаемых: систем частиц TGS и $BaTiO_3$, а также энергию их взаимодействия. При этом основным видом взаимодействия полярных частиц будем считать диполь-дипольное, с энергией W_{dd}:

$$F = \sum_i \left[\frac{1}{2}\alpha_i P_i^2 + \frac{1}{4}\beta_i P_i^4 + \frac{1}{2}\delta_i (\nabla P_i)^2 \right] + \sum_j \left[\frac{1}{2}\alpha_j P_j^2 + \frac{1}{4}\beta_j P_j^4 + \frac{1}{6}\gamma_j P_j^6 + \frac{1}{2}\delta_j (\nabla P_j)^2 \right]_i + \sum_{i,j} \left[\frac{\mathbf{p}_i^* \mathbf{p}_j^*}{r_{ij}^3} - \frac{3(\mathbf{r}_{ij}\mathbf{p}_i^*)(\mathbf{r}_{ij}\mathbf{p}_j^*)}{r_{ij}^5} \right]. \quad (3)$$

Учет энергии взаимодействия W_{dd} в соотношении (3) должен приводить к изменению температуры фазового перехода [19]:

$$\tilde{T}_0 = T_0 + \frac{1}{\alpha_0} W_{dd} = T_0 + \frac{1}{\alpha_0} \sum_i \mathbf{p}_i^* \mathbf{E}_i^*, \quad (4)$$

где $\mathbf{p}_i^*$ – некоторые эффективные значения дипольных моментов; $\mathbf{E}_i^*$ –эффективные локальные поля, действующие на частицу [20].

Знак энергии W_{dd} будет определяться ориентацией дипольных моментов частиц. Однако, поскольку температура фазового перехода TGS в композитах повышается, энергия $W_{dd} > 0$ и дипольные моменты частиц $BaTiO_3$ должны ориентироваться так, чтобы компенсировать поле частиц TGS.

Фазовые переходы в сегнетоэлектрических материалах являются важным объектом исследования в области материаловедения и физики твердого тела. С термодинамической точки зрения, фазовый переход первого рода отличается от перехода второго рода скачкообразным изменением параметра порядка и наличием скрытой теплоты. Однако в реальных неоднородных системах, таких как сегнетоэлектрические материалы с дефектами, примесями и границами зерен, фазовый переход второго рода может оказаться фазовым переходом первого рода.

Изменение рода фазового перехода TGS в композитах связано с тем, что энергия диполь-дипольного взаимодействия W_{dd} при температурах выше и ниже температуры Кюри имеет разные значения. Ниже T_C частицы TGS и $BaTiO_3$ взаимодействуют, обладая собственными дипольными моментами (энергия Кеезома), тогда как выше T_C дипольные моменты частиц $BaTiO_3$, находящихся в сегнетоэлектрической фазе, взаимодействуют с наведенными в TGS дипольными моментами (энергия Дебая). Изменение значения термодинамического потенциала на разную величину ниже и выше фазового перехода вызывает скачок энергии, ведущий к возникновению гистерезиса, и таким образом фазовый переход приобретает признаки перехода не второго, а первого рода.

Заключение

Исследования диэлектрических свойств композитов $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$, где $x = 0{,}10$ и $0{,}20$, которые изготовлены путем смешивания порошков TGS с размером частиц $3 - 5$ мкм и $BaTiO_3$ с размером частиц 400 нм, показали следующие изменения свойств:

повышение (при нагреве) температуры Кюри TGS, входящего в состав композитов, на $\Delta T_C \approx 3$ °C;

увеличение диэлектрической проницаемости композитов, снижение тангенса угла диэлектрических потерь, по сравнению с чистыми образцами TGS;

появление температурного гистерезиса и размытие фазового перехода TGS в составе композитов. Степень гистерезиса возрастает с увеличением содержания частиц $BaTiO_3$ и составляет $\Delta T \approx 4{,}8$ °C при значении $x = 0{,}10$ и $\Delta T \approx 5{,}1$ °C при $x = 0{,}20$.

Все полученные для $(TGS)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ результаты – сдвиг температуры Кюри, увеличение температурного гистерезиса и размытие фазового перехода – находят свое объяснение в рамках феноменологической теории Ландау – Гинзбурга, которая учитывает электрические взаимодействия между компонентами композитных систем и неоднородностью электрических полей (см. раздел, посвященный обсуждению результатов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pei M., Guo J., Zhang B., Wang H., Zhu Y., Wang Q., Tsukagoshi K., Shi Y., Li Y.** Splitting charge injection for ultrahigh on/off ratio in a floating-metal-gated planar organic ferroelectric memory // Materials Today Energy. 2021. Vol. 21. September. P. 100711.

2. **Naber R. C. G., Asadi K., Blom P. W. M., de Leeuw D. M., de Boer B.** Organic nonvolatile memory devices based on ferroelectricity // Advanced Materials. 2010. Vol. 22. No. 9. Pp. 933–945.

3. **Li E., Wu X., Chen Q., Wu S., He L., Yu R., Hu Y., Chen H., Guo T.** Nanoscale channel organic ferroelectric synaptic transistor array for high recognition accuracy neuromorphic computing // Nano Energy. 2021. Vol. 85. July. P. 106010.

4. **Wang K., Zhu H., Ouyang J., Tian Y., Wang S., Li Q., Zhao Yu-Y., Cheng H., Zhai X.** Significantly improved energy storage stabilities in nanograined ferroelectric film capacitors with a reduced dielectric nonlinearity // Applied Surface Science. 2022. Vol. 581. 15 April. P. 152400.

5. **Irzaman H., Ridwan S., Prasta J. R., Heriyanto S., Muhammad Z. I., Brian Y., Zakki F. M., Khairurrijal F.** Ferroelectric sensor $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ integrated with android smartphone for controlling and monitoring smart street lighting // Journal of King Saud University – Science. 2022. Vol. 34. No. 6. P. 102180.

6. **Deepthi P. R., Sukhdev A., Kumar P. M., Angadi V. J., Pasha U. M., Shanthi J.** Structural, FTIR and Ferro electric analysis of pure TGS and *L*-Cysteine doped TGS crystals for infrared device applications // Chemical Data Collections. 2018. Vol. 17–18. December. Pp. 276–286.

7. **Boni O., Berger S.** Dielectric properties of KDP filled porous alumina nanocomposite thin film // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2001. Vol. 1. No. 4. Pp. 433–439.

8. **Голицына О. М., Дрождин С. Н., Нечаев В. Н., Висковатых А. В., Кашкаров В. М., Гриднев А. Е., Чернышев В. В.** Диэлектрические свойства пористых оксидов алюминия и кремния с включениями триглицинсульфата и его модифицированных аналогов // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 3. С. 479–484.

9. **Maia B. D., Nguyen H. T., Tad D. H., Sidorkin A. S., Milovidova S. D.** Preparation and dielectric properties of a mixed ferroelectric composite from nanoparticles of cellulose and triglycine sulfate // Ferroelectrics. 2019. Vol. 543. No. 1. Pp. 175–183.

10. **Nguyen H. T.** Anomalous ferroelectricity in nanocomposites from hydrogen-bonded ferroelectrics with oxidized MWCNT // Applied Physics A. 2022. Vol. 128. No. 11. P. 1032.

11. **Поправко Н. Г., Сидоркин А. С., Миловидова С. Д., Рогазинская О. В.** ИК-спектроскопия сегнетоэлектрических композитов // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 3. С. 510–514.

12. **Trybus M., Chotorlishvili L., Jartych E.** Dielectric and magnetoelectric properties of TGS–magnetite composite // Molecules. 2024. Vol. 29. No. 6. P. 1378.

13. **Лайнс М., Гласс А.** Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 736 с.

14. **Glass A. M.** Investigation of the electrical properties of $Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$ with special reference to pyroelectric detection // Journal of Applied Physics. 1969. Vol. 40. No. 12. Pp. 4699–4713.

15. **Голицына О. М., Дрождин С. Н., Нечаев В. Н. Висковатых А. В., Кашкаров В. М., Гриднев А. Е., Чернышев В. В.** Диэлектрические свойства пористых оксидов алюминия и кремния с включениями триглицинсульфата и его модифицированных аналогов // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 3. С. 479–484.

16. **Baryshnikov S., Milinskiy A., Stukova E.** Dielectric properties of the ferroelectric composites $[AgNa(NO_2)_2]_{0.9}/[NaNO_2]_{0.1}$ and $[AgNa(NO_2)_2]_{0.9}/[BaTiO_3]_{0.1}$ // Ferroelectrics. 2018. Vol. 536. No. 1. Pp. 91–98.

17. **Гинзбург В. Л.** Фазовые переходы в сегнетоэлектриках (несколько исторических замечаний) // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 10. С. 1091–1097.

18. **Маслов В. В., Трюхан Т. А., Барышников С. В.** Уширение фазового перехода для триглицинсульфата в пористых матрицах // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2010. № 122. С. 84–90.

19. **Charnaya E. V., Pirozerskii A. L., Cheng Tien, Lee M. K.** Ferroelectricity in an array of electrically coupled confined small particles // Ferroelectrics. 2007. Vol. 350. No. 1. Pp.75–80.

20. **Вугмейстер Б. Е., Глинчук М. Д.** Особенности кооперативного поведения параэлектрических дефектов в сильно поляризуемых кристаллах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1980. Т. 79. № 3. С. 947–952.

REFERENCES

1. **Pei M., Guo J., Zhang B., et al.,** Splitting charge injection for ultrahigh on/off ratio in a floating-metal-gated planar organic ferroelectric memory, Mater. Today Energy. 21 (Sept) (2021) 100711.

2. **Naber R. C. G., Asadi K., Blom P. W. M., et al.,** Organic nonvolatile memory devices based on ferroelectricity, Adv. Mater. 22 (9) (2010) 933–945.

3. **Li E., Wu X., Chen Q., et al.,** Nanoscale channel organic ferroelectric synaptic transistor array for high recognition accuracy neuromorphic computing, Nano Energy. 85 (July) (2021) 106010.

4. **Wang K., Zhu H., Ouyang J., et al.,** Significantly improved energy storage stabilities in nanograined ferroelectric film capacitors with a reduced dielectric nonlinearity, Appl. Surf. Sci. 581 (15 April) (2022) 152400.

5. **Irzaman H., Ridwan S., Prasta J. R., et al.,** Ferroelectric sensor $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ integrated with android smartphone for controlling and monitoring smart street lighting, J. King Saud Univ. Sci. 34 (6) (2022) 102180.

6. **Deepthi P. R., Sukhdev A., Kumar P. M., et al.,** Structural, FTIR and ferro electric analysis of pure TGS and *L*-Cysteine doped TGS crystals for infrared device applications, Chem. Data Collect. 17–18 (Dec) (2018) 276–286.

7. **Boni O., Berger S.,** Dielectric properties of KDP filled porous alumina nanocomposite thin film, J. Nanosci. Nanotechnol. 1 (4) (2001) 433–439.

8. **Golitsyna O. M., Drozhdin S. N., Nechaev V. N., et al.,** Dielectric properties of porous aluminum and silicon oxides with inclusions of triglycine sulfate and its modified analogs, Phys. Solid State. 55 (3) (2013) 529–535.

9. **Maia B. D., Nguyen H. T., Tad D. H., et al.,** Preparation and dielectric properties of a mixed ferroelectric composite from nanoparticles of cellulose and triglycine sulfate, Ferroelectrics. 543 (1) (2019) 175–183.

10. **Nguyen H. T.,** Anomalous ferroelectricity in nanocomposites from hydrogen-bonded ferroelectrics with oxidized MWCNT, Appl. Phys. A. 128 (11) (2022) 1032.

11. **Popravko N. G., Sidorkin A. S., Milovidova S. D., Rogazinskaya O. V.,** IR spectroscopy of ferroelectric composites, Phys. Solid State. 57 (3) (2015) 522–526.

12. **Trybus M., Chotorlishvili L., Jartych E.,** Dielectric and magnetoelectric properties of TGS–magnetite composite, Molecules. 29 (6) (2024) 1378.

13. **Lines M. E., Glass A. M.,** Principles and applications of ferroelectrics and related materials, Clarendon Press, Oxford, 1977.

14. **Glass A. M.,** Investigation of the electrical properties of $Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$ with special reference to pyroelectric detection, J. Appl. Phys. 40 (12) 4699–4713.

15. **Golitsyna O. M., Drozhdin S. N., Nechaev V. N., et al.,** Dielectric properties of porous aluminum and silicon oxides with inclusions of triglycine sulfate and its modified analogues, Phys. Solid State. 55 (3) (2013) 529–535.

16. **Baryshnikov S., Milinskiy A., Stukova E.,** Dielectric properties of the ferroelectric composites $[AgNa(NO_2)_2]_{0.9}/[NaNO_2]_{0.1}$ and $[AgNa(NO_2)_2]_{0.9}/[BaTiO_3]_{0.1}$, Ferroelectrics. 536 (1) (2018) 91–98.

17. **Ginzburg V. L.,** Phase transitions in ferroelectrics: some historical remarks, Phys.–Usp. 44 (10) (2001) 1037–1043.

18. **Maslov V. V., Tryukhan T. A., Baryshnikov S. V.,** Phase transition broadening for triglitsinsulfate in porous matrices, Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences. (122) (2010) 84–90 (in Russian).

19. **Charnaya E. V., Pirozerskii A. L., Cheng Tien, Lee M. K.,** Ferroelectricity in an array of electrically coupled confined small particles, Ferroelectrics. 350 (1) (2007) 75–80.

20. **Vugmeister B. E., Glinchuk M. D.,** Some features of the cooperative behavior of paraelectric defects in strongly polarizable crystals, Sov. Phys. JETP. 52 (3) (1980) 482–484.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРЫШНИКОВ Сергей Васильевич – *доктор физико-математических наук, профессор кафедры физического и математического образования Благовещенского государственного педагогического университета, г. Благовещенск, Россия.*

675000, Россия, г. Благовещенск, ул. Ленина, 104
svbar2003@list.ru
ORCID: 0000-0002-3362-8975

МИЛИНСКИЙ Алексей Юрьевич – *доктор физико-математических наук, профессор кафедры физического и математического образования Благовещенского государственного педагогического университета, г. Благовещенск, Россия.*

675000, Россия, г. Благовещенск, ул. Ленина, 104
a.milinskiy@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7525-4396

СТУКОВА Елена Владимировна – *доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Амурского государственного университета, г. Благовещенск, Россия.*

675027, Россия, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21
lenast@bk.ru
ORCID: 0000-0002-7981-7456

ЛЬВОВ Андрей Эдуардович – *аспирант кафедры физического и математического образования Благовещенского государственного педагогического университета, г. Благовещенск, Россия.*

675000, Россия, г. Благовещенск, ул. Ленина, 104
andrei.1998.lvov@gmail.com
ORCID: 0009-0004-6095-9026

THE AUTHORS

BARYSHNIKOV Sergey V.
Blagoveshchensk State Pedagogical University
104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russia
svbar2003@list.ru
ORCID: 0000-0002-3362-8975

MILINSKIY Alexey Yu.
Blagoveshchensk State Pedagogical University
104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russia
a.milinskiy@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7525-4396

STUKOVA Elena V.
Amur State University
21 Ignatievskoye Ave., Blagoveshchensk, 675027, Russia
lenast@bk.ru
ORCID: 0000-0002-7981-7456

LVOV Andrey E.
Blagoveshchensk State Pedagogical University
104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russia
andrei.1998.lvov@gmail.com
ORCID: 0009-0004-6095-9026

Статья поступила в редакцию 10.07.2024. Одобрена после рецензирования 31.07.2024. Принята 04.08.2024.
Received 10.07.2024. Approved after reviewing 31.07.2024. Accepted 04.08.2024.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025